

数据驱动的高产额直接驱动薄壳靶设计与实验*

余波^{1)†} 宋仔峰¹⁾ 李志远²⁾ 刘品阳¹⁾ 彭晓世¹⁾ 唐琦¹⁾ 刘中杰¹⁾
 邓志刚¹⁾ 崔波¹⁾ 刘祥明¹⁾ 刘永刚¹⁾ 李纪伟²⁾ 黄天暄¹⁾
 王立锋²⁾ 吴玉迟¹⁾ 杨冬¹⁾ 杨家敏¹⁾ 赵宗清¹⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2025 年 12 月 9 日收到; 2026 年 3 月 5 日收到修改稿)

在大型激光装置通过直接驱动薄壳靶内爆发展的中子或带电粒子实验平台, 具有高产额、短脉冲、各向同性、准单能等优点, 常用于核物理、核天体物理、高能量密度物理等研究. 本文提出了一种数据驱动的高产额直接驱动薄壳靶设计方法, 结合激光功率、波长差、移束策略等优化, 十万焦耳激光装置玻璃靶实验的中子产额达到 1.00×10^{14} , 聚变转换效率达到 4.5%, 大幅提升了十万焦耳激光装置的中子产额和聚变转换效率. 验证实验结果同时表明: 提高激光功率能够显著提高内爆速度、离子温度和中子产额; 多色激光能够抑制束间能量转移造成的激光散射, 提高能量耦合效率, 改善内爆对称性, 并提升离子温度和中子产额; 不同移束策略对中子产额、离子温度、中子发射区对称性等内爆性能无显著影响.

关键词: 直接驱动, 中子产额, 数据驱动

DOI: 10.7498/aps.75.20251695

CSTR: 32037.14.aps.75.20251695

1 引言

利用激光直接辐照和烧蚀薄壳靶, 驱动产生强冲击波并球形向心汇聚, 可以快速加热氘氚燃料至数十 keV 的聚变温度, 产生高产额、短脉冲、各向同性、准单能中子源, 广泛应用于核诊断设备性能考核和灵敏度原位标定^[1-3]、辐照损伤测试^[4,5]、中子弹性或非弹性散射截面测量^[6,7]、中高 Z 元素预混效应和模型校验^[8-10] 等. 当燃料包含氢、氦-3 等元素时, 可以在实验室产生与天体相近的等离子体环境, 研究大爆炸原初阶段和恒星核合成相关的核反应^[11-13]; 产生的单能质子可以作为背光源, 测量高能量密度物理的阻止本领^[14]、自生磁场^[15] 和不稳定性增长^[16] 等; 利用聚变产额与流体状态密切

相关, 还可以探究热斑区域的动理学效应^[17-21]、诊断壳层-燃料混合过程^[22-24] 等.

高产额直接驱动内爆需要高效的聚变转换效率 (聚变放能与激光能量之比), 包括高效的激光吸收效率、火箭效率和动能-内能转换效率. Omega 是典型的直接驱动构型激光装置^[25], 容易实现球对称内爆和高能量耦合效率, 30 kJ 激光直接驱动 $\Phi 900 \mu\text{m}$ 玻璃靶内爆的中子产额高达 10^{14} ^[26], 聚变转换效率接近 9.4%. 为在间接驱动构型的国家点火装置^[27] (National Ignition Facility, NIF) 发展高产额的直接驱动内爆实验平台, Cok 等^[28]、Johnson 等^[29,30]、Ellison 等^[31]、Yeaman 等^[32] 持续优化实验参数, 提升激光能量耦合效率和聚变产额. 首先采用 LILAC, HYDRA, ARES 等一维辐射流体程序优化激光波形、功率和靶丸直径、壳厚、

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1603300) 和等离子体物理全国重点实验室项目 (批准号: 6142A04240202) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yubobnu@163.com

气压等, 然后利用 SAGE 等二维辐射流体程序优化激光瞄准位置和内爆对称性. 然而, 目前 NIF 直接驱动玻璃靶的最高中子产额仅为 7.94×10^{14} [33], 聚变转换效率仅为 3.4%。

虽然 NIF 通过增大靶丸直径 [28–32,34]、更换烧蚀材料 [30–32]、激光离焦和束组劈裂等措施改善内爆性能, 持续提高了薄壳靶实验的中子产额和聚变转换效率, 但受限于激光非球对称排布、激光等离子体不稳定性、束间能量转移、流体力学不稳定性等非理想因素, 实验中子产额仅为二维理论产额的 1/10 左右. 在相同构型的十万焦耳激光装置 [35] 开展直接驱动内爆实验面临同样的设计难题, 以最高二维理论产额为设计目标的直接驱动薄壳靶实验, $\Phi 540 \mu\text{m}$ 和 $\Phi 720 \mu\text{m}$ 玻璃靶的最高中子产额仅为 1.0×10^{13} [36], $\Phi 1000 \mu\text{m}$ 玻璃靶的最高中子产额仅为 3.7×10^{13} , 聚变转换效率远低于 Omega 和 NIF, 迫切需要大幅提升实验的中子产额和聚变转换效率.

本文介绍了一种数据驱动的高产额直接驱动内爆设计方法, 能够在物理认识和数值模拟不精确时, 利用实验数据建立经验模型, 准确识别并把握影响中子产额的核心因素, 实现内爆性能的均衡优化, 以及实验参数的定量设计和内爆性能的准确预估, 从而大幅提升了薄壳靶实验的中子产额和聚变转换效率. 首先介绍数据驱动的实验设计方法, 十万焦耳激光装置玻璃靶的设计结果和预期实验结果; 然后介绍验证实验的能量耦合效率和内爆性能等测量结果; 最后给出小结.

2 数据驱动的直驱内爆设计

提高激光直接驱动薄壳靶中子产额的核心是

提高激光-燃料能量耦合效率, 可以通过提高内爆速度、改善内爆对称性和减低内爆混合等实现, 但三者间存在内禀性矛盾. 其中, 提高内爆速度需要增大靶丸直径、减小壳层厚度或者降低燃料气压, 改善内爆对称性需要减小靶丸直径或增大焦斑直径, 而减低内爆混合需要增大壳层厚度或者增大燃料气压. 针对目前迫切需要提升实验产额, 但物理认识和数值模拟又不精确的现状, 利用实验数据建立经验模型, 结合数值模拟可以实现靶丸直径、壳厚、气压和焦斑直径等参数优化, 从而化解了内爆速度、对称性与混合三者之间的内禀性矛盾, 平衡了一维产额和三维效应之间的关系.

设计过程首先利用十万焦耳激光装置 2015—2023 年开展的直径 $\Phi 540$ — $1000 \mu\text{m}$ 、 SiO_2 厚度 1.9 — $3.8 \mu\text{m}$ 、气压 10 — 50 atm ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) 的 37 发 DD 和 DT 玻璃实验和数值模拟结果, 校验数值模拟程序 Multi1D [37] 的热传导、壳层-燃料混合等模型以及限流因子、扩散因子等系数, 拟合得到激光吸收效率、离子温度、实验产额与一维模拟产额比 (yield over clean, YOC) 等定标率曲线, 如图 1 所示. Multi1D 是一维辐射流体力学程序, 采用局域热传导和 fall-line 混合模型, 限流因子 $f = 0.07$, 包含了核聚变反应过程, 能够计算靶丸内爆产生的中子产额、离子温度和聚变反应峰值发射时刻等信息.

根据实验的聚变反应峰值发射时刻, 通过 Multi1D 模拟得到激光吸收功率, 再与实验的入射激光功率相比, 并按 $1 - a \times e^{b/I_{15}}$ 拟合得到激光吸收效率曲线, 如图 1(a) 所示. 其中, a 和 b 为拟合系数; I_{15} 为激光功率密度, 单位为 10^{15} W/cm^2 . 模拟结果显示, 靶丸直径越大, 靶丸表面的激光功率密度越低, 激光吸收效率越高; 48 TW 激光辐照

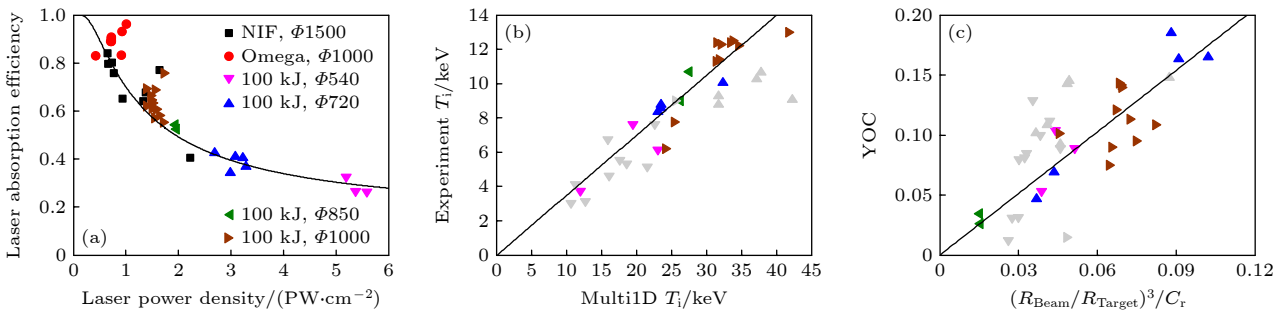


图 1 实验定标率曲线 (a) 激光吸收效率; (b) 离子温度; (c) YOC

Fig. 1. The scaling relations: (a) Laser absorption efficiency; (b) ion temperature; (c) yield over clean.

$\Phi 540\text{ }\mu\text{m}$, $\Phi 720\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\Phi 1000\text{ }\mu\text{m}$ 玻璃靶时, 靶丸表面的激光功率密度约为 5.5 PW/cm^2 , 3 PW/cm^2 , 1.5 PW/cm^2 , 激光吸收效率约为 30%, 40%, 60%. 图中同时给出对 Omega^[8,29] 和 NIF^[20,30] 玻璃靶的吸收效率模拟结果, 实验规律与十万焦耳激光装置基本一致.

同样利用 Multi1D 模拟的离子温度与实验测量的离子温度之比, 线性拟合得到离子温度定标率曲线, 如图 1(b) 所示. 图中, 相同形状实验数据对应相同直径靶丸, 灰色数据表示缺少靶丸壳厚或峰值发射时刻实测结果, 模拟使用设计值或拟合值. 图 1(b) 的结果显示: 理论模拟与实验测量的离子温度正相关; 靶丸直径越大, 理论模拟和实验测量的离子温度越高.

通过程序校验并使用激光吸收效率曲线, 可以确保一维产额模拟结果较为可靠, 但无法直接给出最优的壳厚或气压参数, 还需要建立经验模型考虑三维效应对一维产额的影响. Lees 等^[38,39] 对 Omega 直接驱动冷冻靶实验结果分析表明, 实验 YOC 与激光焦斑 (R_{Beam}) 和靶丸直径 (R_{Target}) 比值、一阶不对称性、内爆稳定性等有关. 应用于十万焦耳激光装置薄壳靶实验, YOC(本文为实验产

额与 Multi1D 模拟产额比) 主要与初始辐照均匀性 ($R_{\text{Beam}}/R_{\text{Target}}$)³ 成正比, 与收缩比 C_r 成反比, 如图 1(c) 所示. 其中, $\Phi 1000\text{ }\mu\text{m}$ 靶丸使用 $\Phi 800\text{ }\mu\text{m}$ 激光焦斑, 其余靶丸使用 $\Phi 500\text{ }\mu\text{m}$ 激光焦斑.

然后利用 Multi1D 程序, 结合定标率曲线开展实验参数扫描, 给出最优实验设计, 并预测实验性能. 对于目前可以制备的最大直径 $\Phi 1200\text{ }\mu\text{m}$ 玻璃靶, 48 TW 激光辐照在靶丸表面的平均功率密度约为 1 PW/cm^2 , 根据图 1(a) 给出激光吸收效率为 70%, 有效激光功率为 33.6 TW. 在给定激光功率和玻璃靶直径, 不同壳厚和气压的中子产额、离子温度、峰值发射时刻和收缩比计算结果如图 2 所示. 根据图 2 计算结果, 最高的一维理论产额可达 6×10^{14} ; 当壳层厚度小于 $2.9\text{ }\mu\text{m}$ 或者大于 $4.7\text{ }\mu\text{m}$ 时, 一维理论产额快速降低; 壳层越薄, 气压越低, 离子温度越高, 峰值发射时刻越晚; 壳层越薄, 气压越高, 收缩比越小.

根据激光焦斑直径 $\Phi 800\text{ }\mu\text{m}$ 、图 2(d) 收缩比、图 1(c) YOC 曲线计算得到不同壳厚和气压的 YOC, 再与图 2(a) 的一维理论产额相乘, 得到实验预期中子产额, 结果如图 3(a) 所示. 利用图 2(b) 一维离子温度与图 1(b) 离子温度定标率曲线相乘,

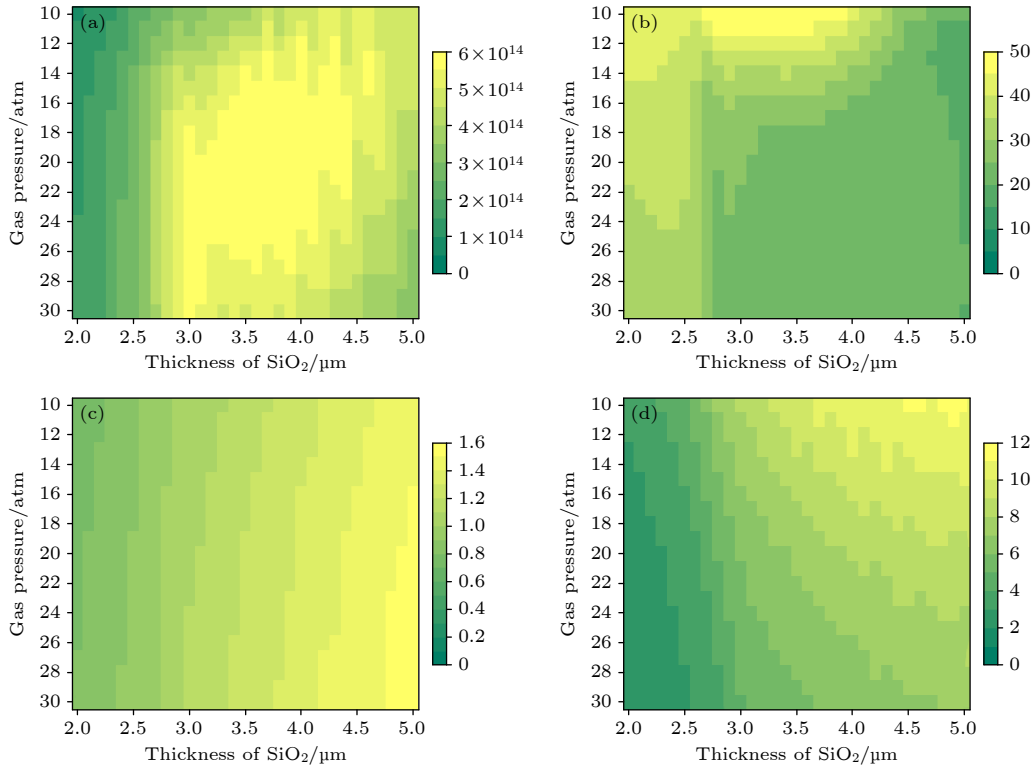


图 2 Multi1D 模拟结果 (a) 一维理论产额; (b) 离子温度; (c) 峰值发射时刻; (d) 收缩比

Fig. 2. Simulation results of Multi1D: (a) 1D yield; (b) ion temperature; (c) bang time; (d) convergence ratio.

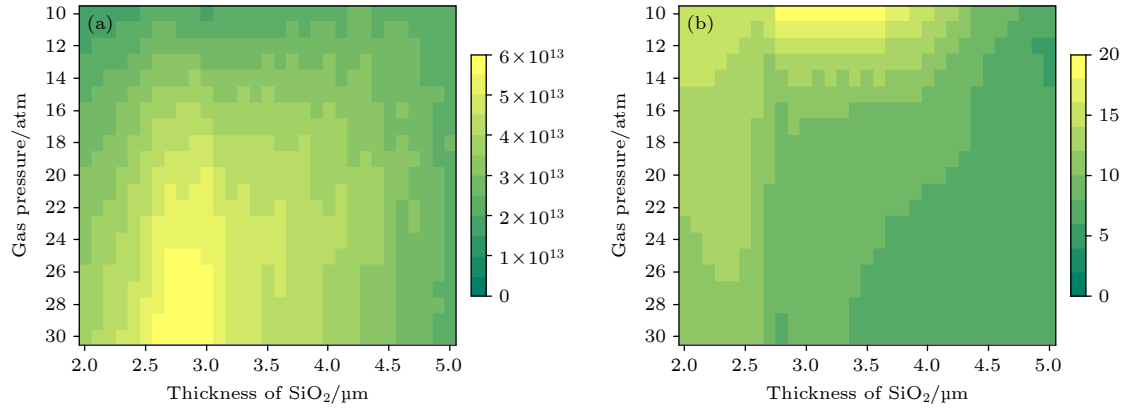


图3 实验预测结果 (a) 中子产额; (b) 离子温度

Fig. 3. Predicted experimental results: (a) Neutron yield; (b) ion temperature.

得到实验预期离子温度, 如图3(b)所示. 模拟结果表明, 气压越高, 虽然离子温度逐渐降低, 但中子产额逐渐增高, 主要原因是压缩后燃料的面密度快速增大. 壳层越薄, 离子温度越高; 壳层越厚, 收缩比越大, 即燃料面密度也越高. 中子产额随壳层增大, 先增大后减小, 最优壳厚为2.5—3 μm . 考虑不同壳厚的气体渗透速率和耐压能力, $\Phi 1200 \mu\text{m}$ 玻璃微球的最优壳厚为3.0 μm , 氘氚燃料气压为20 atm. 预期实验产额大于 5×10^{13} , 离子温度大于9 keV, 峰值发射时刻约为1.1 ns, 收缩比约为6.

综上所述, 通过数据学习方式得到激光吸收效率、离子温度、YOC等实验定标率曲线, 并应用于数值模拟形成的激光直接驱动薄壳靶设计方法, 能够在物理认识和数值模拟不精确时, 准确识别并把握影响中子产额的核心因素——内爆收缩比, 平衡一维产额和三维效应之间的关系, 给出实验参数的定量设计和内爆性能的准确预估, 提升薄壳靶实验的中子产额.

3 高产额的薄壳靶验证实验

为了验证上述设计方法, 在十万焦耳激光装置^[35]开展了实验. 十万焦耳激光装置是间接驱动构型的激光装置, 48束激光沿 28.5° , 35° , 49.5° , 55° 四环从上下半球注入, 每环4, 4, 8, 8束激光, 单束激光的标准输出功率为1 TW. 每束激光均使用连续相位板^[40]进行光束匀滑, 焦斑尺寸为 $\Phi 800 \mu\text{m}$, 四环椭圆度分别为0.8, 1, 1, 0.8, 焦斑强度可近似为五阶超高斯分布^[41]. 验证实验的玻璃靶采用

烧结法制备^[42], 直径为 $\Phi(1220 \pm 20) \mu\text{m}$, 壳厚为 $(3.2 \pm 0.1) \mu\text{m}$, 原子比为1:1的DT气压为 (21.8 ± 1.2) atm.

实验排布见图4. 使用针孔相机 (PHC) 监测激光注入, 使用全孔径背向散射诊断系统^[43] (FABS) 测量散射光份额, 使用铜活化系统^[44] (Cu A) 测量DT中子产额, 使用中子飞行时间谱仪^[45] (nTOF) 测量离子温度, 使用聚变反应历程测量系统^[46] (NTD) 测量聚变峰值发射时刻, 使用中子半影成像系统^[47] (NIS) 测量中子发射区尺寸和形状.

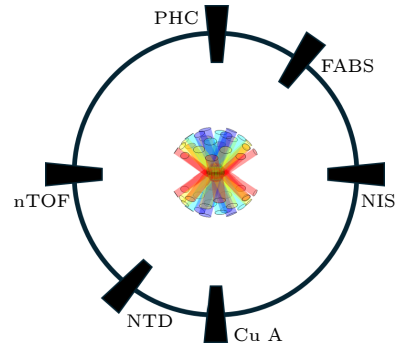


图4 验证实验排布

Fig. 4. Schematic of the experimental setup.

实验大部分发次使用脉宽1.2 ns、功率1 TW/束的方波激光, 少量发次通过增大功率至1.1 TW/束以提高中子产额. 为了提升能量耦合效率和内爆性能, 实验对比了单色激光 (四环激光波长差为 $\{0, 0, 0, 0\} \text{ \AA}$)、三色激光 (四环激光波长差为 $\{4, 5, 0, 0\} \text{ \AA}$) 和四色激光 (四环激光波长差为 $\{3, 5, -1, 0\} \text{ \AA}$) 对激光束间能量转移的抑制效果. 此外, 实验通过调整各环激光指向靶丸的位置^[48], 使辐照在靶丸表面赤道区和极区的激光功率密度之比分

别满足 1.33, 1.37, 1.47, 以研究 3 种移束策略对内爆对称性的影响。

验证实验测量的激光能量耦合、内爆性能结果如图 5 所示。由于全孔径背向散射诊断系统通过终端光学组件对散射激光进行测量, 空间上仅能测量小部分散射光, 实验测量的散射光份额 (f_{FABS}) 较低, 如图 5(a) 所示。实验结果还显示, 相同波长差时, 靶丸直径越大散射光份额越低, 激光功率越高散射光份额越高。这是因为靶丸表面的激光功率密度随靶丸直径增大而降低。相同直径时, 增加各环激光波长差可以抑制束间能量转移, 降低散射光份额。

DT 中子产额测量结果图 5(b) 显示, 中子产额随靶丸直径变化不明显, 但随激光功率增加而增加。在单束激光功率为 1 TW、不使用波长差时, 实验最高中子产额为 7.95×10^{13} , 略高于理论设计结果。使用波长差后, 实验中子产额逐渐增大, 最高中子产额达 9.09×10^{13} 。波长差可以降低束间能量转移造成的激光散射, 提高能量耦合效率, 提升内爆性能。而且相比于三色波长差, 四色波长差对中子产额的提升效果更明显。进一步提高单束激光功率至 1.1 TW 时, 实验最高中子产额提高至 1.00×10^{14} , 聚变转换效率达 4.5%, 聚变转换效率略高于 NIF 高产额玻璃靶实验 [33]。

图 5(c) 是离子温度测量结果, 所有发次的离子温度均大于 11 keV, 最高离子温度为 14.5 keV, 高于理论设计结果。使用三色和四色波长差后, 离子温度显著升高, 与中子产额显著增大一致。相同波长差时, 激光功率越高, 离子温度越高, 也与中子产额越高一致。

聚变反应峰值发射时刻测量结果为 1.19—1.26 ns, 如图 5(d) 所示, 略晚于理论设计结果。主要原因是相比于实验设计, 验证实验的靶丸直径略大、壳层略厚、气压略高, 导致内爆聚心时刻更晚。激光功率相同时, 波长差对聚变峰值发射时刻影响小, 主要由于内爆速度还与靶直径、壳层厚度密切相关。波长差相同时, 激光功率越高, 聚变峰值发射时刻越小, 意味着内爆速度越大, 与离子温度和中子产额越高一致。

在取 20% 等高线时, 实验给出的中子发射区半径为 65—76 μm , 如图 5(e) 所示, 受激光功率、移束策略和波长差的影响较小。根据中子发射区半径计算的收缩比约为 8, 考虑等高线取值和对称性影响, 与实验设计基本相符。但是, 中子发射区形状与波长差密切相关, 受激光功率和移束策略影响小, 如图 5(f) 所示。激光功率相同时, 增大波长差后, 中子发射区 P_2 逐渐减小至 0 附近, 其原因是波长差提升了极区大入射角激光的吸收效率。

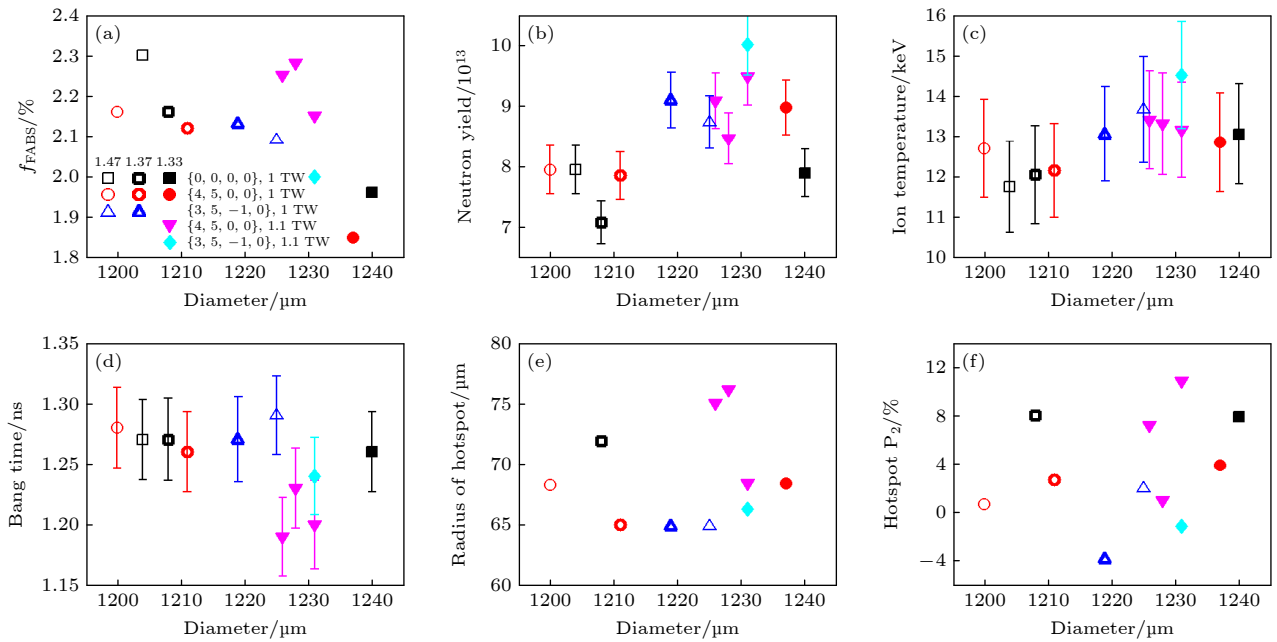


图 5 验证实验测量结果 (a) 散射光份额; (b) 中子产额; (c) 离子温度; (d) 峰值发射时刻; (e) 中子发射区半径; (f) 中子发射区形状
Fig. 5. Measurement results of validation experiments: (a) Fraction of scattered light; (b) neutron yield; (c) ion temperature; (d) neutron bang time; (e) radius of neutron emission images; (f) symmetry of neutron emission images.

综合图 5 的实验测量结果, 使用波长差能够抑制束间能量转移造成的激光散射, 改善内爆对称性, 从而提高离子温度和中子产额. 仅通过增大靶丸赤道区的激光功率密度, 由于激光功率密度增大导致的吸收效率降低, 会抵消增大的入射激光能量, 使得耦合至靶丸赤道区的有效激光能量不会显著增大、内爆对称性不会显著改善, 从而离子温度和中子产额也不会显著增大.

当单束激光功率为 1 TW、不使用波长差时, 实验测量的离子温度约为 12 keV、中子产额大于 7×10^{13} , 均略大于理论设计结果. 这可能有两方面的原因: 一是验证实验使用的 $\Phi 1200 \mu\text{m}$ 玻璃微球采用烧结法^[42]制备, 相比于前期实验使用的炉内法玻璃微球, 其球形度略好、表面和结构缺陷更少, 使得实验的内爆性能更好; 二是 $\Phi 1200 \mu\text{m}$ 玻璃靶的内爆速度高达 600 km/s, 可能有更为显著的动理学等效效应^[17–21], 会通过碰撞冲击波或静电无碰撞冲击波进一步加热离子, 使离子温度和中子产额高于 Multi1D 程序的数值模拟结果.

4 结 论

在大型激光装置通过直接驱动薄壳靶内爆发展的中子或带电粒子实验平台, 具有高产额、短脉冲、各向同性、准单能等优点, 常用于核物理、核天体物理、高能量密度物理等研究. 为了进一步提升十万焦耳激光装置薄壳靶实验的中子产额和聚变转换效率, 提出了一种数据驱动的高产额直接驱动内爆设计方法, 能够在物理认识和数值模拟不精确时, 准确识别并把握影响中子产额的核心因素, 完成实验参数的定量设计和内爆性能的准确评估.

十万焦耳激光装置玻璃靶验证实验结果显示, 数据驱动的高产额直接驱动内爆设计方法是可靠的, 最高中子产额达到 1.00×10^{14} , 聚变转换效率达到 4.5%, 聚变转换效率略高于 NIF 高产额玻璃靶实验. 验证实验结果同时表明, 提高激光功率能够提高内爆速度、离子温度和中子产额. 使用多色激光能够抑制束间能量转移造成的激光散射, 提高能量耦合效率, 改善内爆对称性, 提升离子温度和中子产额. 不同移束策略对中子产额、离子温度、中子发射区对称性等内爆性能无显著影响.

实验测量的中子产额、离子温度均略高于理论设计结果, 表明有必要进一步完善大直径薄壳靶的

数值模拟方法. 后续还将通过对比实验研究烧结法和炉内法玻璃靶的差异, 优化各环激光的波长差, 持续提升激光直接驱动薄壳靶实验的中子产额.

参考文献

- [1] Springstead M P, Zylstra A B, Kim Y, Meaney K D, Geppert-leinrath H, Leatherland A, Wilson L, Herrmann H W, Young C S, Polk P, Hamilton C 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 073503
- [2] Waugh C J, Rosenberg M J, Zylstra A B, Frenje J A, Séguin F H, Petrasso R D, Glebov V Y, Sangster T C, Stoeckl C 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 053506
- [3] Rinderknecht H G, Johnson M G, Zylstra A B, Sinenian N, Rosenberg M J, Frenje J A, Waugh C J, Li C K, Séguin F H, Petrasso R D, Rygg J R, Kimbrough J R, MacPhee A, Collins G W, Hicks D, Mackinnon A, Bell P, Bionta R, Clancy T, Zacharias R, Döppner T, Park H S, LePape S, Landen O, Meezan N, Moses E I, Glebov V U, Stoeckl C, Sangster T C, Olson R, Kline J, Kilkenny J 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10D902
- [4] Datte P, Manuel A M, Eckart M, Jackson M, Khater H, Newton M 2013 *Proc. SPIE* **8850** 885003
- [5] Dayton M, Datte P, Carpenter A, Eckart M, Manuel A, Khater H, Hargrove D, Bell P 2017 *Proc. SPIE* **10390** 1039007
- [6] Frenje J A, Li C K, Séguin F H, Casey D T, Petrasso R D, McNabb D P, Naveetil P, Quagliioni S, Sangster T C, Glebov V Yu, Meyerhofer D D 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 122502
- [7] Forrest C J, Knauer J P, Schroeder W U, Glebov V Yu, Radha P B, Regan S P, Sangster T C, Sickles M, Stoeckl C, Szczepanski J 2018 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **888** 169
- [8] Herrmann H W, Langenbrunner J R, Mack J M, Cooley J H, Wilson D C, Evans S C, Sedillo T J, Kyrala G A, Caldwell S E, Young C S, Nobile A, Wermer J, Paglieri S, McEvoy A M, Kim Y, Batha S H, Horsfield C J, Drew D, Garbett W, Rubery M, Glebov V Yu, Roberts S, Frenje J A 2009 *Phys. Plasmas* **16** 056312
- [9] Dodd E S, Benage J F, Kyrala G A, Wilson D C, Wysocki F J, Seka W, Glebov V Yu, Stoeckl C, Frenje J A 2012 *Phys. Plasmas* **19** 042703
- [10] Miles A R, Chung H K, Heeter R, Hsing W, Koch J A, Park H S, Robey H F, Scott H A, Tommasini R, Frenje J, Li C K, Petrasso R, Glebov V, Lee R W 2012 *Phys. Plasmas* **19** 072702
- [11] Zylstra A B, Herrmann H W, Johnson M G, Kim Y H, Frenje J A, Hale G, Li C K, Rubery M, Paris M, Bacher A, Brune C R, Forrest C, Glebov V Y, Janezic R, McNabb D, Nikroo A, Pino J, Sangster T C, Séguin F H, Seka W, Sio H, Stoeckl C, Petrasso R D 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 035002
- [12] Zylstra A B, Frenje J A, Johnson M G, Hale G M, Brune C R, Bacher A, Casey D T, Li C K, McNabb D, Paris M, Petrasso R D, Sangster T C, Sayre D B, Séguin F H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 222701
- [13] Casey D T, Sayre D B, Brune C R, Smalyuk V A, Weber C R, Tipton R E, Pino J E, Grim G P, Remington B A, Dearborn D, Benedetti L R, Frenje J A, Johnson M G, Hatarik R, Izumi N, McNaney J M, Ma T, Kyrala G A, MacLaren S, Salmonson J, Khan S F, Pak A, Hopkins L, Berzak, LePape S, Spears B K, Meezan N B, Divol L,

- Yeaman C B, Caggiano J A, McNabb D P, Holunga D M, Zucca M Chiarappa, Kohut T R, Parham T G 2017 *Nat. Phys.* **13** 1227
- [14] Zylstra A B, Frenje J A, Grabowski P E, Li C K, Collins G W, Fitzsimmons P, Glenzer S, Graziani F, Hansen S B, Hu S X, Johnson M G, Keiter P, Reynolds H, Rygg J R, Séguin F H, Petrasso R D 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 215002
- [15] Li C K, Séguin F H, Frenje J A, Rosenberg M J, Petrasso R D, Amendt P A, Koch J A, Landen O L, Park H S, Robey H F, Town R P J, Casner A, Philippe F, Betti R, Knauer J P, Meyerhofer D D, Back C A, Kilkenny J D, Nikroo A 2010 *Science* **327** 1231
- [16] Manuel M J E, Li C K, Séguin F H, Frenje J A, Casey D T, Petrasso R D, Hu S X, Betti R, Hager J, Meyerhofer D D, Smalyuk V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 255006
- [17] Rinderknecht H G, Amendt P A, Wilks S C, Collins G 2018 *Plasma Phys. Control. Fusion* **60** 064001
- [18] Kabadi N V, Simpson R, Adrian P J, Bose A, Frenje J A, Johnson M G, Lahmann B, Li C K, Parker C E, Séguin F H, Sutcliffe G D, Petrasso R D, Atzeni S, Eriksson J, Forrest C, Fess S, Glebov V Y, Janezic R, Mannion O M, Rinderknecht H G, Rosenberg M J, Stoeckl C, Kagan G, Hoppe M, Luo R, Schoff M, Shulberg C, Sio H W, Sanchez J, Hopkins L B, Schlossberg D, Hahn K, Yeaman C 2021 *Phys. Rev. E* **104** L013201
- [19] Sio H, Larroche O, Atzeni S, Kabadi N V, Frenje J A, Johnson M G, Stoeckl C, Li C K, Forrest C J, Glebov V, Adrian P J, Bose A, Birkel A, Regan S P, Séguin F H, Petrasso R D 2019 *Phys. Plasmas* **26** 072703
- [20] Rinderknecht H G, Rosenberg M J, Li C K, Hoffman N M, Kagan G, Zylstra A B, Sio H, Frenje J A, Johnson M G, Séguin F H, Petrasso R D, Amendt P, Bellei C, Wilks S, Delettrez J, Glebov V Y, Stoeckl C, Sangster T C, Meyerhofer D D, Nikroo A 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 025001
- [21] Rinderknecht H G, Sio H, Li C K, Zylstra A B, Rosenberg M J, Amendt P, Delettrez J, Bellei C, Frenje J A, Johnson M G, Séguin F H, Petrasso R D, Betti R, Glebov V Yu, Meyerhofer D D, Sangster T C, Stoeckl C, Landen O, Smalyuk V A, Wilks S, Greenwood A, Nikroo A 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 135001
- [22] Rinderknecht H G, Rosenberg M J, Zylstra A B, Lahmann B, Séguin F H, Li C K, Johnson M G, Petrasso R D, Berzak Hopkins L F, Caggiano J A, Divol L, Hartouni E P, Hatarik R, Hatchett S P, Pape S L, Mackinnon A J, McNaney J M, Meezan N B, Moran M J, Bradley P A, Kline J L, Krashennikova N S, Kyrala G A, Murphy T J, Schmitt M J, Tregillis I L, Batha S H, Knauer J P, Kilkenny J D 2015 *Phys. Plasmas* **22** 082709
- [23] Larroche O, Rinderknecht H G, Rosenberg M J 2018 *Phys. Rev. E* **98** 031201
- [24] Sio H, Larroche O, Bose A, Atzeni S, Frenje J A, Kabadi N V, Johnson M G, Li C K, Glebov V, Stoeckl C, Lahmann B, Adrian P J, Regan S P, Birkel A, Séguin F H, Petrasso R D 2022 *Phys. Plasmas* **29** 072710
- [25] Boehly T R, Brown D L, Craxton R S, Keck R L, Knauer J P, Kelly J H, Kessler T J, Kumpan S A, Loucks S J, Letzring S A, Marshall F J, McCrory R L, Morse S F B, Seka W, Soures J M, Verdon C P 1997 *Opt. Commun.* **133** 495
- [26] Soures J M, McCrory R L, Verdon C P, Babushkin A, Bahr R E, Boehly T R, Boni R, Bradley D K, Brown D L, Craxton R S, Delettrez J A, Donaldson W R, Epstein R, Jaanimagi P A, Jacobs S D, Kearney K, Keck R L, Kelly J H, Kessler T J, Kremens R L, Knauer J P, Kumpan S A, Letzring S A, Lonobile D J, Loucks S J, Lund L D, Marshall F J, McKenty P W, Meyerhofer D D, Morse S F B, Okishev A, Papernov S, Pien G, Seka W, Short R, Shoup III M J, Skeldon M, Skupsky S, Schmid A W, Smith D J, Swales S, Wittman M, Yaakobi B 1996 *Phys. Plasmas* **3** 2108
- [27] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, Bowers M W, Dixit S N, Erbert G V, Heestand G M, Henesian M A, Hermann M R, Jancaitis K S, Manes K R, Marshall C D, Mehta N C, Menapace J, Moses E, Murray J R, Nostrand M C, Orth C D, Patterson R, Sacks R A, Shaw M J, Spaeth M, Sutton S B, Williams W H, Widmayer C C, White R K, Yang S T, Van Wouterghem B M 2007 *Appl. Opt.* **46** 3276
- [28] Cok A M, Craxton R S, McKenty P W 2008 *Phys. Plasmas* **15** 082705
- [29] Johnson M G, Zylstra A B, Bacher A, Brune C R, Casey D T, Forrest C, Herrmann H W, Hohenberger M, Sayre D B, Bionta R M, Bourgade J L, Caggiano J A, Cerjan C, Craxton R S, Dearborn D, Farrell M, Frenje J A, Garcia E M, Glebov V Yu, Hale G, Hartouni E P, Hatarik R, Hohensee M, Holunga D M, Hoppe M, Janezic R, Khan S F, Kilkenny J D, Kim Y H, Knauer J P, Kohut T R, Lahmann B, Landoas O, Li C K, Marshall F J, Masse L, McEvoy A, McKenty P, McNabb D P, Nikroo A, Parham T G, Paris M, Petrasso R D, Pino J, Radha P B, Remington B, Rinderknecht H G, Robey H, Rosenberg M J, Rosse B, Rubery M, Sangster T C, Sanchez J, Schmitt M, Schoff M, Séguin F H, Seka W, Sio H, Stoeckl C, Tipton R E 2017 *Phys. Plasmas* **24** 041407
- [30] Johnson M G, Casey D T, Hohenberger M, Zylstra A B, Bacher A, Brune C R, Bionta R M, Craxton R S, Ellison C L, Farrell M, Frenje J A, Garbett W, Garcia E M, Grim G P, Hartouni E, Hatarik R, Herrmann H W, Hohensee M, Holunga D M, Hoppe M, Jackson M, Kabadi N, Khan S F, Kilkenny J D, Kohut T R, Lahmann B, Le H P, Li C K, Masse L, McKenty P W, McNabb D P, Nikroo A, Parham T G, Parker C E, Petrasso R D, Pino J, Remington B, Rice N G, Rinderknecht H G, Rosenberg M J, Sanchez J, Sayre D B, Schoff M E, Shulberg C M, Séguin F H, Sio H, Walters Z B, Whitley H D 2018 *Phys. Plasmas* **25** 056303
- [31] Ellison C L, Whitley H D, Brown C R D, Copeland S R, Garbett W J, Le H P, Schneider M B, Walters Z B, Chen H, Castor J I, Craxton R S, Johnson M G, Garcia E M, Graziani F R, Kemp G E, Krauland C M, McKenty P W, Lahmann B, Pino J E, Rubery M S, Scott H A, Shepherd R, Sio H 2018 *Phys. Plasmas* **25** 072710
- [32] Yeaman C B, Kemp G E, Walters Z B, Whitley H D, McKenty P W, Garcia E M, Yang Y, Craxton R S, Blue B E 2021 *Nucl. Fusion* **61** 046031
- [33] Zylstra A B, Yeaman C, Pape S L, MacKinnon A, Hohenberger M, Fittinghoff D N, Herrmann H, Kim Y, Radha P B, McKenty P W, Craxton R S, Hoppe M 2020 *Phys. Plasmas* **27** 124501
- [34] Kemp G E, Yeaman C B, Hohenberger M, Bhandarkar S, Blue B E, Briggs T M, Craxton R S, Divol L, Do M, Farrell M, Haid A, Haines B M, MacLaren S A, McKenty P W, Moestopo W P, Oakdale J, Olson R E, Ping Y, Rosenberg M J, Schmitt M J, Thomas C A, Whitley H D, Widmann K, Xia X 2025 *Phys. Plasmas* **32** 022702
- [35] Zheng W G, Wei X F, Zhu Q, Jing F, Hu D X, Yuan X D, Dai W J, Zhou W, Wang F, Xu D P, Xie X D, Feng B, Peng Z T, Guo L F, Chen Y B, Zhang X J, Liu L Q, Lin D H, Dang Z, Xiang Y, Zhang R, Wang F, Jia H T, Deng X W 2017 *Matter Radiat. Extremes* **2** 243
- [36] Yu B, Yang J M, Huang T X, Wang P, Shang W L, Qiao X

- M, Deng X W, Zhang Z W, Song Z F, Tang Q, Peng X S, Chen J B, Li Y L, Jiang W, Pu Y D, Yan J, Chen Z J, Zheng W D, Wang F, Jiang S E, Ding Y K, Zheng J 2019 *Chin. Phys. B* **28** 095203
- [37] Ramis R, Temporal M, Canaud B, Brandon V 2014 *Phys. Plasmas* **21** 082710
- [38] Lees A, Betti R, Knauer J P, Gopalaswamy V, Patel D, Woo K M, Anderson K S, Campbell E M, Cao D, Carroll-Nellenback J, Epstein R, Forrest C, Goncharov V N, Harding D R, Hu S X, Igumenshchev I V, Janezic R T, Mannion O M, Radha P B, Regan S P, Shvydky A, Shah R C, Shmayda W T, Stoeckl C, Theobald W, Thomas C 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 105001
- [39] Lees A, Betti R, Knauer J P, Gopalaswamy V, Patel D, Woo K M, Anderson K S, Campbell E M, Cao D, Carroll-Nellenback J, Epstein R, Forrest C J, Goncharov V N, Harding D R, Hu S X, Igumenshchev I V, Janezic R T, Mannion O M, Radha P B, Regan S P, Shvydky A, Shah R C, Shmayda W T, Stoeckl C, Theobald W, Thomas C 2023 *Phys. Plasmas* **30** 012709
- [40] Yang C L, Zhang R Z, Xu Q, Ma P 2008 *Appl. Opt.* **47** 1465
- [41] Weilacher F, Radha P B, Collins T J B, Marozas J A 2015 *Phys. Plasmas* **22** 032701
- [42] Huang J L, Ai X, Liu Y S, Wang T, He X S, Chen G, He Z B 2024 *J. Mater. Res. Technol.* **30** 6332
- [43] Wang F, Peng X S, Yan Y D, Xu T, Wei H Y, Li Y L, Li N 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 0902011 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 闫亚东, 徐涛, 魏惠月, 理玉龙, 李楠 2015 *中国激光* **42** 0902011]
- [44] Song Z F, Tang Q, Chen J B, Liu Z J, Zhan X Y, Deng C B 2015 *High Power Laser Part. Beams* **27** 112005 (in Chinese) [宋仔峰, 唐琦, 陈家斌, 刘中杰, 詹夏宇, 邓才波 2015 *强激光与粒子束* **27** 112005]
- [45] Chen J B, Zheng Z J, Peng H S, Zhang B H, Ding Y K, Chen M, Chen H S, Wen T S 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 3534
- [46] Wang F, Peng X S, Kang D G, Liu S Y, Xu T 2013 *Chin. Phys. B* **22** 115204
- [47] Chen Z, Zhang X, Wang F, Yu B, Zheng J, Huang T, Dong Y, Yang D, Yang J 2022 *J. Instrum.* **17** C03026
- [48] Yu B, Ding Y K, Jiang W, Huang T X, Chen B L, Pu Y D, Yan J, Chen Z J, Zhang X, Yang J M, Jiang S E, Zheng J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 145202 (in Chinese) [余波, 丁永坤, 蒋炜, 黄天珣, 陈伯伦, 蒲昱东, 晏骥, 陈忠靖, 张兴, 杨家敏, 江少恩, 郑坚 2017 *物理学报* **66** 145202]

Data-driven design and experiments of high yield direct drive thin-shell target*

YU Bo^{1)†} SONG Zifeng¹⁾ LI Zhiyuan²⁾ LIU Pinyang¹⁾ PENG Xiaoshi¹⁾
TANG Qi¹⁾ LIU Zhongjie¹⁾ DENG Zhigang¹⁾ CUI Bo¹⁾ LIU Xiangming¹⁾
LIU Yonggang¹⁾ LI Jiwei²⁾ HUANG Tianxuan¹⁾ WANG Lifeng²⁾
WU Yuchi¹⁾ YANG Dong¹⁾ YANG Jiamin¹⁾ ZHAO Zongqing¹⁾

¹⁾ (Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

²⁾ (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

(Received 9 December 2025; revised manuscript received 5 March 2026)

Abstract

High-yield, short-pulse, quasi-monoenergetic neutron and charged particle experimental platforms, developed through laser direct drive implosion of thin-shell targets, are widely used in research areas such as nuclear physics, nuclear astrophysics, and high energy density physics. To achieve high neutron yield in laser direct drive implosion experiments, a data-driven high yield direct drive implosion design method is proposed. When physical understanding and numerical simulations are imprecise, this approach utilizes existing experimental data to establish empirical models and optimize parameters such as pulse shapes, capsule diameter, capsule thickness, fill pressures, and laser spot diameter. It effectively resolves the inherent trade-offs among implosion velocity, hot-spot symmetry, and shell-fuel mixing while balancing the relationship between one-dimensional yield and three-dimensional effects. The design process is initiated by utilizing preliminary experimental data and extensive numerical calculations to calibrate the Multi1D code. This includes refining its physical models of thermal conduction and shell-fuel mixing, as well as adjusting coefficients such as the flux limiter and diffusion multiplier. Furthermore, scaling relations of laser absorption efficiency, yield over clean (YOC), and ion temperature are derived. Subsequently, the calibrated Multi1D code, integrated with these empirical scaling relations, is employed to carry out quantitative simulations to determine the optimal shell thickness and fuel pressure of the glass targets, and to predict experimental yield, ion temperature, and convergence ratio. Validation experiments using 1200 μm diameter glass targets are conducted on the 100 kJ laser facility. The results demonstrate that a neutron yield of 1.00×10^{14} is achieved by applying the data-driven high yield direct drive implosion design and optimizing laser power and wavelength. This is a substantial enhancement over previous results on the 100 kJ laser facility. The fusion conversion efficiency, defined as the fusion output divided by the laser energy incident on the capsule, is 4.5%, slightly higher than that reported for NIF glass targets. It is also found that increasing laser power significantly improves implosion velocity, ion temperature, and neutron yield. Additionally, the use of wavelength separation among the different cone beams effectively suppresses laser losses caused by crossed-beam energy transfer, resulting in significantly improved energy coupling efficiency, hot-spot symmetry, and neutron yield. The four-color laser configuration performs significantly better than the three-color laser. In contrast, various laser repointing strategies show no significant impact on implosion performance, including neutron yield, ion temperature, and hot-spot symmetry.

Keywords: laser direct drive, neutron yield, data driven

DOI: [10.7498/aps.75.20251695](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251695)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251695](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251695)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1603300) and the National Key Laboratory of Plasma Physics of China (Grant No. 6142A04240202).

† Corresponding author. E-mail: yubobnu@163.com



数据驱动的高产额直接驱动薄壳靶设计与实验

余波 宋仔峰 李志远 刘品阳 彭晓世 唐琦 刘中杰 邓志刚 崔波 刘祥明 刘永刚 李纪伟 黄天暄 王立锋
吴玉迟 杨冬 杨家敏 赵宗清

Data-driven design and experiments of high yield direct drive thin-shell target

YU Bo SONG Zifeng LI Zhiyuan LIU Pinyang PENG Xiaoshi TANG Qi LIU Zhongjie DENG
Zhigang CUI Bo LIU Xiangming LIU Yonggang LI Jiwei HUANG Tianxuan WANG Lifeng WU
Yuchi YANG Dong YANG Jiamin ZHAO Zongqing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 120502 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251695
CSTR: 32037.14.aps.75.20251695

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251695>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光驱动等离子体环境中的核反应数据测量

Measurement of nuclear reaction data in a laser-driven plasma environment
物理学报. 2026, 75(9): 120502 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251219>

稠密等离子体焦点关键参数对 neutron 产额的影响

Influence of key parameters of dense plasma focus on neutron yield
物理学报. 2026, 75(10): 120502 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251704>

双束对射激光驱动超薄靶的超短脉冲中子源

Ultrashort pulsed neutron source driven by two counter-propagating laser pulses interacting with ultra-thin foil
物理学报. 2023, 72(18): 185201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230706>

数据驱动与机器学习辅助的铁电材料

Data-driven and machine learning-assisted research on ferroelectric materials
物理学报. 2026, 75(9): 185201 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251772>

在间接驱动内爆实验中采用花生腔增强对称性调控

Improving symmetry tuning with I-raum in indirect-driven implosions
物理学报. 2023, 72(2): 025201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20220861>

定中和驱动一体化的超导转子驱动方法

Superconducting rotor drive method with integrated driving and alignment
物理学报. 2024, 73(3): 038401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231455>